

## Verfahren zur Herstellung einer Multilayerschicht und Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens

5

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Herstellung dünner Schichten sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens.

10 Zur Herstellung dünner Schichten sind verschiedenste Verfahren aus dem Bereich physikalischer und chemischer Abscheidetechniken bekannt. Abhängig von den gewünschten Eigenschaften der abzuscheidenden Schicht und des gewählten Materialsystems werden unterschiedliche Verfahren eingesetzt.

15 Insbesondere für Materialien mit hohem Schmelzpunkt ist die Methode der Kathodenzerstäubung (Sputtern) vorteilhaft, bei der in einem Vakuumbereich, der deutlich über einem typischen Restgasdruck für ein Aufdampfverfahren liegt, durch Einwirken eines elektrischen Feldes ein Plasma gezündet wird, aus dem Ionen auf ein auf hohem elektrischen Kathodenpotential liegendes Target beschleunigt werden und diese Ionen Atome aus dem Target heraus schlagen, welche sich sodann auf den Wänden der Vakuumkammer und auf einem zum Target beabstandeten, üblicherweise auf Masse oder 20 einer geringen Blasspannung liegenden Substrat niederschlagen. Ein Erhitzen der Materialquelle ist dabei nicht notwendig, vielmehr wird das Target beim Prozess gekühlt. Dabei resultiert ein Restgasdruck üblicherweise überwiegend aus einem Inertgas wie etwa Argon, welches keine störenden Einflüsse auf die sich auf dem Substrat bildende Schicht zeigt. Zur Abscheidung von Verbindungen wie Nitride, Carbide oder Oxide oder 25 dergleichen können dem Sputtergas zusätzlich entsprechende Reaktivgase beigemischt werden.

Das Substrat wird üblicherweise ausserhalb der Plasmazone angeordnet, um eine Schädigung der frisch aufwachsenden Schicht durch Bestrahlung aus dem Plasma oder Rücksputtereffekte zu vermeiden. Die mittlere freie Weglänge der Ionen muss gross 30 genug sein, um mit ausreichender kinetischer Energie, d.h. mit möglichst wenig Störungen durch weitere Stossprozesse im Restgas, auf das Target zu gelangen und andererseits die zerstäubten Atome auf das Substrat gelangen zu lassen, was den möglichen Restgasdruck nach oben begrenzt. Andererseits muss der Druck hoch genug

**BESTÄTIGUNGSKOPIE**

sein, um überhaupt ein stabiles Plasma zünden zu können. Durch magnetfeldunterstütztes Kathodenzerstäuben gelingt es, am Target eine erhöhte Elektronendichte zu erzeugen, die in einer hohen Plasmadichte am Target und daher in einer stark erhöhten Zerstäubungsrate resultiert.

- 5 Durch Zufügen reaktiver Komponenten, insbesondere Sauerstoff, zum Inertgas können auch Oxide hergestellt werden. Ein solches reaktives Zerstäubungsverfahren ist z.B. aus der WO 01/73151 A1 bekannt. Dort wird der Sauerstoffpartialdruck beim Sputtern des Oxids mittels einer Lambda-Sonde geregelt, damit sich in der aufwachsenden Schicht ein stöchiometrisches Oxid bilden kann. Allerdings reagiert auch das Target mit dem
- 10 Reaktivgas, so dass konkurrierende Verfahren, nämlich Abtrag einerseits und eine die Abtragung hemmende Oxidbildung an der Targetoberfläche ablaufen. Dies hat wiederum Rückwirkungen auf die elektrischen Potentiale in der Beschichtungskammer, die Plasmabildung und dergleichen. Ebenso bilden die sich auf den inneren Oberflächen der Vakuumkammer abscheidenden Schichten des zerstäubten Materials Getterflächen,
- 15 welche z.B. Sauerstoff als Reaktivkomponente binden und so zu einer gegenseitigen, schwer vorhersagbaren Abhängigkeit verschiedenster Verfahrensparameter führt. Auch hier ist also der Zusammenhang zwischen den Beschichtungsparametern sehr komplex. Häufig kommt es dabei zu gegenseitiger Beeinflussung, wenn ein einzelner Beschichtungsparameter verändert wird. Je nach abzuschcheidendem Schichtmaterial ist es
- 20 daher notwendig, die Beschichtungsverfahren und die Beschichtungsparameter individuell aufeinander abzustimmen. Dies gilt umso mehr, je komplexer ein abzuschcheidendes Schichtsystem ist, etwa bei der Abscheidung von Multischichten mit speziellen Funktionseigenschaften, insbesondere optischen Funktionsschichten. Die erwähnten Probleme sind besonders stark ausgeprägt bei dem sogenannten reaktiven DC-
- 25 Magnetron-Sputtering von metallischen Verbindungen, bei dem die Forderung nach einer reaktiven Verbindung auf der Substratoberfläche bei gleichzeitiger metallischer Targetoberfläche nur mit hohem Aufwand erreichbar ist. Zur Herstellung von isolierenden Schichten, wie z.B.  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und dergleichen sind daher bereits auch Verfahren entwickelt worden, bei denen mittels jeweils zwei Magnetron-Sputterkathoden, die von
- 30 einer Wechselstromquelle gespeist werden, zwei Targets alternierend eingesetzt werden. Die Polaritäten der Targetpotentiale ändern sich üblicherweise im KHz Bereich, d.h. Jede Elektrode ist abwechselnd Kathode und Anode. Dies führt zu einem definierten Ladungstransport zwischen Kathode und Anode ohne hemmenden Einfluss einer Oxidschicht an den Targetoberflächen, im Gegensatz zum störenden Effekt der
- 35 sogenannten "disappearing anode" beim reaktiven DC-Magnetron-Sputtering.

Ein effizienter Betrieb setzt dabei jedoch voraus, dass in dem sogenannten Übergangsbereich gearbeitet wird, da ansonsten die Oxidbildung an der Targetoberfläche schneller als die Abtragrate ist.

- 5 Aus der EP 0 795 623 A1 ist eine Vorrichtung zum Aufbringen dünner Titanoxidschichten mittels reaktiver Kathodenzerstäubung bekannt. Dabei wird die Stromversorgung der Kathode durch ein Signal eines  $\lambda$ -Sonden-Messfühlers, der den Anteil von Sauerstoff in der Vakuumkammer mit einem Referenzgas vergleicht, geregelt. Das Verfahren eignet sich besonders zur langzeitstabilen Abscheidung von Oxiden, die möglichst homogen und mit gleichbleibender Zusammensetzung hergestellt werden sollen.
- 10 Aus der DE 42 36 264 C1 ist ein plasmagestütztes Elektronenstrahlbedampfen bekannt, bei dem ein Oxid mit sehr hoher Rate mittels eines Elektronenstrahlverdampfers verdampft und auf einem Substrat abgeschieden wird. Beim Verdampfen dissoziiert jedoch das Oxid, so dass Sauerstoff verloren geht und nicht mehr zur Oxidbildung in der aufwachsenden Schicht zur Verfügung steht. Zwischen Substrat und Verdampfungsquelle
- 15 befindet sich daher ein Plasmaraum mit einem Sauerstoffplasma, in dem der Dampf auf dem Weg zum Substrat angeregt wird, so dass sich auf dem Substrat ein stöchiometrisches Oxid niederschlagen kann. Je nach Materialsystem gelingt die Abscheidung eines stöchiometrischen Oxids, indem entweder der Partialdruck des Reaktivgases oder die Plasmaparameter während der Beschichtung geregelt werden.
- 20 Dabei sind die Zusammenhänge sehr komplex und von einem Materialsystem auf ein anderes kaum übertragbar. Eine Variation einzelner Verfahrensparameter führt bei verschiedenen Materialsystemen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Optimierte Abscheideparameter für z.B. Aluminiumoxid führen nicht zu optimalen Ergebnissen z.B. bei Siliziumoxid. Darüber hinaus zeigen sich auch innerhalb ein- und desselben
- 25 Materialsystems Langzeitdriften verschiedener nicht getrennt erfassbarer Verdampfungsparameter, die zu unerwünschten Änderungen der Eigenschaften der abgeschiedenen Schichten führen und die Reproduzierbarkeit eines eingefahrenen Beschichtungsprozesses zusätzlich erschweren.

- Aus der EP 0 1516 436 E1 ist eine Magnetron-Sputtervorrichtung zur reaktiven
- 30 Abscheidung eines Materials auf ein Substrat bekannt mit einer Magnetron-Sputtereinrichtung und einer sekundären Plasmaeinrichtung. Die Sputtereinrichtung und die sekundäre Plasmaeinrichtung bilden jeweils Sputter- und Aktivierungszonen, die atmosphärisch und physikalisch benachbart sind. Durch das Zusammenbringen der

Sputter- und Aktivierungszone werden die Plasmen beider Zonen zu einem einzigen kontinuierlichen Plasma vermischt.

Aus der EP 0 716 160 B1 ist eine Beschichtungsvorrichtung bekannt mit einer Abscheidungs- und einer Vorrichtung zum Erzeugen eines Plasmas von Ionen-  
5 niedriger Energie. Die Abscheidungs- und Plasmavorrichtungen können selektiv betrieben werden, so dass eine Kompositschicht gebildet wird, die mindestens mehrere Schichten aufweist. Die Zusammensetzung einer jeden Schicht kann aus mindestens einer der folgenden Substanzen ausgewählt sein: ein erstes Metall, ein zweites Metall, ein Oxid des ersten Metalls, ein Oxid des zweiten Metalls, Mischungen des ersten und zweiten Metalls  
10 und Oxide von Mischungen des ersten und zweiten Metalls.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein Verfahren zur Herstellung dünner Schichten anzugeben, mit dem zuverlässig in situ die Zusammensetzung der Schicht kontrolliert beeinflusst werden kann, sowie eine Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens zu schaffen.

15 Ferner ist es eine Aufgabe der Erfindung, ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Herstellung einer optisch verlustarmen Multilayerschicht zu schaffen, insbesondere nach dem oben beschriebenen erfindungsgemäßen Verfahren.

Die Aufgabe wird mit jeweils den Merkmalen der unabhängigen Ansprüche gelöst.

Gegenüber dem aus dem Stand der Technik bekannten Aufoxidieren metallischer  
20 Schichten oder Halbleiterschichten, erlaubt insbesondere die gezielte Abscheidung einer substöchiometrischen Schicht im Bereich einer Sputtereinrichtung eine Steigerung der Beschichtungsrate, da die nachfolgende Plasmaeinwirkung dickere Schichten in kürzerer Zeit zum stöchiometrischen Oxid oxidieren kann. Ferner erlaubt die erfindungsgemäße reaktive Abscheidung einer Schicht mit einer vorgegebenen Schichtdicke mit einem  
25 optischen Verlust, der einen vorgegebenen Mindestwert unterschreitet, und nachfolgender Plasmaeinwirkung eine relativ schnelle Herstellung von Schichten mit geringen optischen Verlusten. Im Vergleich zu bekannten reaktiven Sputterprozessen kommt der Sputterprozeß weniger durch Störungen wie Überschlüge oder Kathoden-Arcing zum Erliegen während gleichzeitig Schichten hoher Qualität gebildet werden.

30 Gemäß einem weiteren Aspekt der Erfindung wird bei einem Verfahren zur Herstellung einer Multilayerschicht mit zumindest einer reaktiv betreibbaren Beschichtungseinrichtung

und zumindest einer Reaktionseinrichtung in einer Vakuumkammer auf zumindest einem relativ zu den besagten Einrichtungen bewegbaren Substrat auf einer ersten Schicht mittels der Beschichtungsstation eine Abscheidung einer zweiten Schicht mit mindestens einer Reaktivkomponente vorgenommen. Mittels der Reaktionseinrichtung erfolgt eine  
5 Änderung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schichten. Zur Verringerung eines optischen Verlustes der Multilayerschicht unter einen vorgegebenen Wert ist es erfindungsgemäß vorgesehen, in einem an die erste Schicht angrenzenden Bereich der zweiten Schicht mittels der Beschichtungseinrichtung ein Interface aufzubauen mit einer Dicke  $d_i$  und einem Wert eines Defizits der Reaktivkomponente DEF kleiner als ein Wert  
10 DEF<sub>i</sub>. Dieses Verfahren ermöglicht die Änderung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schichten umfassend zu kontrollieren und vorzugsweise Multilayerschichten mit geringen optischen Verlusten bzw. einer geringen optischen Reflexion und hohen Transmissionen herzustellen.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Herstellung von Multilayern mit minimalen  
15 optischen Verlusten geht von der Erkenntnis aus, dass die abgeschiedenen Schichten möglichst eine vollständige Stöchiometrie zwischen einem ersten Konstituenten und einer reaktiven Konstituenten aufweisen sollte. Erfindungsgemäß wird dabei der reaktive Sputterprozess in einem Modus kontrollierter Substöchiometrie betrieben und in einem zweiten Schritt der fehlende Anteil des reaktiven Konstituenten durch die Wirkung der  
20 zusätzlichen Plasmaquelle zur Verfügung gestellt. Beispielsweise ist die Sequenz zur Herstellung von stöchiometrischen SiO<sub>2</sub>-Schichten wie folgt: In einem ersten Schritt erfolgt eine Sputterbeschichtung unter Verwendung eines metallischen Siliziumtargets, wobei ein Reaktivgasfluss von Sauerstoff eingesetzt wird und zu einer substöchiometrischen Verbindung einer Schicht von beispielsweise SiO<sub>1,6</sub> führt. Der zugehörige Wert des  
25 Defizits der Reaktivkomponente DEF ist dann 0.4. In einem zweiten Schritt erfolgt eine Plasmaaktivierung mit Sauerstoff als Reaktivgas, was zu einer vollständig stöchiometrischen SiO<sub>2</sub>-Schicht führt.

Die Abscheidung derartiger Schichten wird durch Parameter bestimmt, die materialabhängig sind. Hierbei ist es erfindungsgemäß stets möglich, einen optimalen  
30 Kompromiss zwischen einer hohen Sputterrate und einer maximal erreichbaren Stöchiometrie im ersten Schritt kombiniert mit einer maximal effektiven anschließenden Behandlung durch die Plasmaquelle im zweiten Schritt zu gewährleisten.

Erfindungsgemäß werden bei der Herstellung von Schichten, insbesondere Multilayerschichten mit einer hochbrechenden Schicht und einer angrenzenden niedrigbrechenden Schicht, beispielsweise zwischen  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  und  $\text{SiO}_2$ , weitere Maßnahmen ergriffen, um optische Verluste zu vermindern. Diese Maßnahmen sind vorzugsweise angezeigt, da aufgrund der extrem hohen Reaktivität von Silizium eine substöchiometrische Verbindung wie beispielsweise  $\text{SiO}_{1.6}$ , die auf einer vollstöchiometrischen  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ -Schicht aufgesputtert ist, Sauerstoff aus der  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ -Schicht entfernt wird, bevor die  $\text{SiO}_{1.6}$ -Schicht durch die Plasmaquelle in einen vollstöchiometrischen Zustand verändert worden ist. Dies führt zu einer Verschlechterung der optischen Eigenschaften von zumindest einigen Schichten des hochbrechenden Materials und damit zu einer Verschlechterung der Multilayerschicht, insbesondere proportional zur Anzahl der involvierten Interfaces. Erfindungsgemäß wird vorzugsweise, um den beschriebenen Effekt zu verhindern, in beispielsweise einem Bereich des Interfaces, der unmittelbar an das hochbrechende Material angrenzt, eine niedrigbrechende Schicht mit einer gewissen Dicke aufgebracht, die sich in einem weitgehend oder vollstöchiometrischen Zustand befindet. Beispielsweise kann diese Schicht typischerweise eine Dicke von 3.6 nm im Fall von  $\text{SiO}_2$  aufweisen. Dieser Bereich des Interfaces wirkt als Barriere für den Schutz der darunter liegenden hochbrechenden Schicht. Sobald eine kritische Dicke des besagten Bereichs erreicht worden ist, können die Parameter des Sputterprozesses verändert werden in Richtung auf die Abscheidung von Schichten mit einem höheren Grad an Substöchiometrie bzw. einem höheren Wert des Defizits DEF der Reaktivkomponente. Es besitzt demnach eine nach dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellte  $\text{SiO}_2$ -Schicht eine interne Struktur, wobei ein erster Teil ein geringes Defizit an Sauerstoff und ein zweiter Teil einen höheren Wert des Defizits aufweist.

Bevorzugt ist die Herstellung von Multilayerschichten mit alternierend aufeinander folgenden Schichten aus einem hochbrechenden und einem niederbrechenden Material. Bevorzugt ist als hochbrechendes Material  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$  oder  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und als niederbrechendes Material  $\text{SiO}_2$  vorgesehen.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren gelingt die Abscheidung dünner Schichten mit hoher Präzision und ausgezeichneter Güte. In einer besonders bevorzugten Ausführungsform gelingt die Herstellung oxidischer, carbidischer und nitridischer Schichten mit hoher optischer Güte.

Weitere Ausgestaltungen und Vorteile der Erfindung sind den weiteren Ansprüchen sowie unabhängig von ihrer Zusammenfassung in den Ansprüchen der Beschreibung zu entnehmen.

Die Erfindung wird anhand von Zeichnungen näher beschrieben, wobei die Figuren in  
5 schematischer Darstellung zeigen:

Fig. 1 Eine Prinzipdarstellung einer bevorzugten Anordnung von Substrat, Target und Plasmaquelle zur Oxidation einer Schicht.

Fig. 2 bis Fig. 5 Kennlinien bei einer reaktiven Kathodenzerstäubung.

Fig. 6 Ein Beispiel der optischen Transmission einer Schicht als Funktion der  
10 Wellenlänge mit und ohne rf-Plasmaquelle als Parameter der Kurvenschar.

Fig. 7 Ein Beispiel der optischen Transmission einer Schicht als Funktion der Wellenlänge mit der Substratgeschwindigkeit als Parameter der Kurvenschar.

Fig. 8 Zeigt Beispiele für optische Verluste von Einzelschichten mit unterschiedlichen Schichtdicken.

15 Fig. 9 Die Struktur einer Multilayerschicht mit Interface.

Fig. 10 Den Einfluss der Anzahl von Interfaces bei einer Multilayerschicht auf Transmission und Reflektion.

Fig. 11 Den Effekt einer Minimierung des optischen Verlustes für eine Multilayerschicht nach dem erfindungsgemäßen Verfahren.

20 Fig. 12 Optische Verluste für Einzel- und Multilayerschichten aus hoch- und niederbrechendem Material und für verschiedene Schichtdicken; die mit A und B bezeichneten Kurven entsprechen Multilayern mit 77 bzw. 21 Interfaces ohne Interfaceoptimierung; die mit C, D, E, F bezeichneten Kurven entsprechen Einzelschichten; eine Multilayerschicht und 77 Interfaces und  
25 Interfaceoptimierung ist mit XY bezeichnet.

Fig. 13 Transmission und Reflektion für eine Multilayerschicht mit geringen optischen Verlusten, beispielsweise für Breitbandfilter.

Fig. 14 Optische Verluste für eine Multilayerschicht für verschiedene Dicken eines Interfaces. A entspricht einer Dicke von 2,7nm, B einer Dicke von 3,6nm.

Fig. 15 Kennlinien bei einer reaktiven Kathodenzerstäubung von Silizium mit Leistungen von 1KW und 1,5KW.

5 Fig. 16 Werteverläufe verschiedener Verfahrensparameter bei einer reaktiven Kathodenzerstäubung von Silizium.

Mit dem erfindungsgemäßen Verfahren können durch reaktives Sputtern ohne das Vakuum zu brechen Schichten mit geringen optischen Verlusten hergestellt werden, welche Reaktionskomponenten wie Sauerstoff, Kohlenstoff oder Stickstoff enthalten. Im  
10 Folgenden wird eine Oxidherstellung beschrieben; das Verfahren ist jedoch auch für Carbide oder Nitride oder Mischungen wie Oxinitride oder Carbonitride oder dergleichen geeignet, wobei auch 2 oder mehr reaktive Gase (Reaktivgase) als Reaktivkomponente gleichzeitig benutzt werden können.

Fig. 1 zeigt eine schematische Skizze einer bevorzugten Anordnung zur Abscheidung einer Schicht gemäß einer Ausführungsform der Erfindung. Eine Oxidschicht 1 wird in  
15 einer Vakuumkammer 10 mit einem Restgas auf einem Substrat 2 abgeschieden. Die Vakuumkammer 10 ist in mehrere Bereiche A, B, C eingeteilt. Vorzugsweise hat jeder Bereich A, B, C eine eigene, nicht dargestellte Gaszuführung, sowie eine eigene Pumpenversorgung. Vorzugsweise ist das Vakuum kohlenwasserstofffrei und wird mit  
20 einem trockenlaufenden Pumpensatz erzeugt. Es können auch mehr als drei solcher Bereiche vorgesehen sein. Die Bereiche A, B, C sind vorzugsweise voneinander mit Blenden abgeteilt, die nur durch Schlitze miteinander verbunden sind. Damit wird eine vakuummäßige Trennung von im Folgenden noch näher beschriebenen Prozessstationen, nämlich Sputtereinrichtungen bzw. eine Plasmaquelle, in den  
25 Bereichen A, B, C erreicht. Vorzugsweise sind die Prozessstationen plasmamässig entkoppelt. Die Drücke, vorzugsweise die Partialdrücke von Gasen im Restgas (Sputtergas) der Anlage können im wesentlichen unabhängig voneinander eingestellt werden. Vorzugsweise ist ein Inertgas wie Argon Ar und ein Reaktivgas, vorzugsweise Sauerstoff O<sub>2</sub> im Restgas enthalten.

30 Im Bereich A ist als Sputtereinrichtung 3 eine erste Kathodenzerstäubungsquelle vorgesehen, vorzugsweise eine Magnetronquelle, besonders bevorzugt ein an sich bekanntes Magnetronquellensystem mit zwei nebeneinander liegenden

Magnetronanordnungen, auch als Twinmag bekannt. Die Stromversorgung kann eine Versorgungseinheit mit DC-, DC-Puls- oder Mittelfrequenz- (MF) oder Hochfrequenz- (HF) oder eine kombinierte DC-HF-Versorgung sein. Typische Spannungsbereiche der Sputterkathode sind 400V bis 800V. Vorzugsweise wird eine MF-Quelle mit 40 kHz eingesetzt.

In dem Bereich A wird mittels reaktivem Sputtern ein Sputtermaterial eines Targets zerstäubt, wobei sich jeweils mit einer arbeitspunktabhängigen Sputterraten ein Sputtermaterial-Sauerstoff-Verbund an Wänden der Vakuumkammer 1 und auf den Substraten 2 niederschlägt. Bevorzugte Sputtermaterialien sind Metalle und Metalllegierungen wie Al, Nb, Hf, Ta, Ti, Zr, TiNb sowie Halbleiter wie Si.

Im Bereich B ist eine Plasmaquelle 5 angeordnet, die ein Plasma erzeugt, welches angeregte Ionen und Radikale des reaktiven Bestandteils des Restgases enthält. Die reaktiven Teilchen wirken auf die abgeschiedene Schicht ein und oxidieren diese weiter. Die Plasmaquelle 5 kann beispielsweise eine DC-, HF- MF- oder DC-Puls- oder DC+HF-Mikrowellen-Plasmaquelleneinrichtung, insbesondere eine Hall End Plasmaquelle, eine Heisskathoden DC-Plasmaquelle, eine Hochfrequenz-Plasmaquelle, eine Mittelfrequenz- oder eine gepulste DC-Plasmaquelle sein. Die Energie der Plasmaquelle 5 ist einstellbar, vorzugsweise auf einen Bereich 10 eV bis 200 eV oder auch 400eV. Vorzugsweise wird eine ECWR-Plasmaquelle (Electron-Cyclotron-Wave-Resonance) eingesetzt, bei der die Energie der Plasmateilchen weitgehend unabhängig von der Plasmadichte in der Plasmaquelle 5 eingestellt werden kann.

In einem Bereich A der Vakuumkammer 10, vorzugsweise zwischen den beiden Bereichen A und B, kann eine Heizvorrichtung angeordnet sein, vorzugsweise eine Strahlungsheizung mit Quarzstrahlern. Alternativ können auch Infrarot-Strahler vorgesehen sein. Damit können die Substrate auf mehrere hundert Grad erhitzt werden, beispielsweise auf 250°C.

Ferner ist ein Bereich C vorgesehen, in dem eine zweite Kathodenzerstäubungsquelle 7 diametral gegenüberliegend angeordnet ist, welche vorzugsweise wie die erste Kathodenzerstäubungsquelle 3 ausgebildet ist. In einer weiteren Ausführungsform sind weitere Sputtereinrichtungen und/oder Plasmaquellen in der Vakuumkammer vorgesehen.

Räumlich zwischen den Bereichen A und C ist eine optische Messeinrichtung (optischer Monitor) 8 zum optischen Monitoring angeordnet, mittels der optische Eigenschaften der aufwachsenden Schichten bestimmt werden können. Bevorzugt werden, wie an sich bekannt, Transmission und/oder Reflexion einer Schicht intermittierend auf mindestens einem der Substrate zur Ermittlung von optischen Eigenschaften der aufgetragenen Schicht gemessen. Damit kann insbesondere auch die aufwachsende optische Schichtdicke überprüft werden.

Eine vorzugsweise planare Transporteinrichtung 6 bewegt ein Substrat 2 mindestens einmal nacheinander an mindestens einer Kathodenzerstäubungsquelle 3, 7 und an mindestens einer Station mit einer Plasmaquelle 5 vorbei. Dabei ist die Transporteinrichtung 6 vorzugsweise ein Substrat-Drehteller mit einer einstellbaren Geschwindigkeit von beispielsweise 1 bis 500 rpm. Die Beschleunigung auf hohe Solldrehzahlen kann in wenigen Stufen und jeweils innerhalb desselben Bereichs A, B, C erfolgen. Anstelle einer planaren Transporteinrichtung kann auch eine an sich bekannte trommelförmige Einrichtung zur Halterung und zum Transport der Substrate eingesetzt werden. In diesem Fall sind Sputtereinrichtung und Plasmaquelle einem peripheren Oberflächenbereich der Trommel zugeordnet.

Üblicherweise werden ein oder mehrere Substrate 2 auf dem Drehteller 6 befestigt. Der Übersichtlichkeit wegen ist nur eines der in der Figur 1 als Kreis gezeigten Substrate mit einem Bezugszeichen bezeichnet.

In der Vakuumkammer 10 wird das Substrat 2 von dem Drehteller 6 unter die erste Kathodenzerstäubungsquelle 3 bewegt. Dort wird durch Kathodenzerstäubung das Target zerstäubt, wobei sich aus dem Target herausgeschlagenes Material auf dem Substrat niederschlägt. Als Sputtergas wird in einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung ein Argon-Sauerstoffgemisch verwendet, so dass die auf dem Substrat 2 aufwachsende Schicht 1 ein Oxid ist.

Gemäß der Erfindung wird der Kathodenzerstäubungsprozess so betrieben, dass in dem Bereich A bzw. C unter Zuführung einer Reaktivkomponente gezielt eine Verbindungsschicht mit vorgegebener Zusammensetzung abgeschieden wird. Die Schicht 1 wird mit zumindest zwei Konstituenten gebildet, wobei der reaktive Bestandteil  $O_2$  einen der Konstituenten bildet und, bezogen auf den Bestandteil  $O_2$ , die Schicht 1

substöchiometrisch hergestellt. Bezogen auf eine stöchiometrische Verbindung der Konstituenten wird die Schicht 1 mit einem vorgegebenen Defizit, beispielsweise von höchstens 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30, 20 oder weniger Atomprozent des reaktiven Bestandteils  $O_2$  abgeschieden. Anschließend wird in dem Bereich B der Gehalt des Bestandteils  $O_2$  in situ mittels einer Plasmaeinwirkung auf die Schicht 1 in der Schicht 1 bis zur stöchiometrischen Zusammensetzung erhöht und/oder die Struktur der Schicht modifiziert. Statt des reaktiven Bestandteils  $O_2$  kann im Bereich B auch ein anderes reaktives Gas zugeführt werden.

10 Besonders günstig ist es, wenn der Partialdruck des Bestandteils  $O_2$  in dem Bereich der Kathodenzerstäubungsquelle 3 während der Beschichtung des Substrats 2 auf einen im Wesentlichen konstanten Wert geregelt wird. Günstigerweise wird der Partialdruck des Bestandteils  $O_2$  über dessen Gasfluss eingestellt. Es ist auch möglich, den Sauerstoffpartialdruck über die elektrische Leistung der Kathodenzerstäubungsquelle 3  
15 konstant einzustellen, wobei die Rate über die Targetlebensdauer in besonders hohem Masse konstant gehalten werden kann.

Weiterhin kann in dem Bereich A der Kathodenzerstäubungsquelle 3 während der Beschichtung des Substrats 2 eine Intensität einer Plasmaemissionslinie, vorzugsweise  
20 einer Emissionslinie für das Targetmaterial, des reaktiven Bestandteils oder eine Kombination beider auf einen wesentlichen Konstantwert geregelt werden. Dieses kann über den Gasfluss des Bestandteils  $O_2$  und/oder die elektrische Leistung der Kathodenzerstäubungsquelle 3 eingestellt werden.

25 Die Schichteligenschaften können auch variiert werden, indem die Geschwindigkeit, mit der das Substrat 2 an der Plasmaquelle 5 und/oder der Kathodenzerstäubungsquelle 3 vorbei geführt wird, verändert wird.

Eine Schicht kann erfindungsgemäß auch über mehrere Zwischenschritte durch  
30 unterstöchiometrische Abscheidung/Oxidation hergestellt werden. Weiterhin können Mehrfachschichten abgeschieden werden, bei denen durch Variation der Schichtparameter in Einzellschichten wechselnde Brechungsindizes entlang einer aufwachsenden Gesamtschicht erzielt werden. Solche Mehrfachschichten können beispielsweise kontrolliert abgeschieden werden, indem die Beschichtungs- und/oder  
35 Oxidationszeit, und/oder die Anzahl der Rotationen eingestellt wird und/oder über die

optische Messeinrichtung 8 die Beschlichtung anhand der optischen Eigenschaften der aufwachsenden Schicht oder Schichtfolge gesteuert wird.

Gemäß einer anderen Ausführungsform der Erfindung wird in dem Bereich A der Kathodenzerstäubungsquelle 3 unter Hinzufügung einer vorgegebenen Menge der Reaktivkomponente auf dem Substrat eine Schicht mit einer vorgegebenen Schichtdicke abgeschieden, die optische Verluste geringer als ein vorgegebener Mindestwert aufweist. Als optischer Verlust wird dabei in an sich bekannter Weise die im Allgemeinen wellenlängenabhängige Dämpfung einer auf eine Schicht einfallenden Lichtwelle bezeichnet. Die optischen Verluste können aus Messungen der Transmission und Reflektion ermittelt werden. Da das Streulicht durch diffuse Streuung in einem Zusammenhang mit der Rauigkeit einer Oberfläche steht, lassen sich aus den optischen Verlusten einer Schicht auch Rückschlüsse auf die Oberflächenbeschaffenheit ziehen. Bevorzugt werden erfindungsgemäß die optischen Verluste mittels der optischen Messeinrichtung (optischer Monitor) 8 bestimmt. Der optische Monitor 8 ist besonders bevorzugt als ein Einwellenlängen- oder Mehrwellenlängen Spektrometer, insbesondere als Spektralfotometer oder Ellipsometer, besonders bevorzugt Spektralellipsometer ausgebildet. Es werden nach Abscheidung einer vorgegebenen Schichtdicke, die optischen Verluste ermittelt und es folgt eine Einstellung von Schichtelgenschaften in Abhängigkeit von einem Signal des optisches Monitors 8. Bei Einsatz eines Spektralfotometers können in einfache Weise Transmission, Absorption und Reflektion in einem vorgegebenen Spektralbereich und als Funktion der Schichtdicke ermittelt werden.

Im Folgenden wird für eine bevorzugte Ausführungsform des erfindungsgemäßen Verfahrens die Prozessführung zur Herstellung einer Schicht durch reaktives Sputtern mit einer anschließenden Modifikation der aufgebrachten Schicht beschrieben. Andere Prozessführungen sind ebenfalls von der Erfindung umfasst. Als Sputtereinrichtung wird ein Magnetronquellensystem mit zwei nebeneinander liegenden Magnetronanordnungen mit zwei Niob-Targets eingesetzt. Die Targets werden in einem MF – Bereich, beispielsweise mit einer Frequenz von 40 kHz alternierend betrieben. Beiden Targets sind mit Shuttern zugeordnet, mit denen die Sputtereinrichtung gegenüber den Substraten isoliert werden kann. Die Plasmaquelle, welcher ebenfalls ein Shutter zugeordnet ist, wird in einem Radiofrequenzbereich angesteuert.

In einem ersten Schritt wird die Sputtereinrichtung in einen Arbeitspunkt eingestellt, wobei zur Stabilisierung des Prozesses die Shutter geschlossen sind. Es erfolgt ein Einlass von einem Inertgas und einer Reaktivkomponente (beispielsweise Argon und Sauerstoff) in dem Bereich der Sputtereinrichtung. Ferner folgt ein Einlass von einem Inertgas und einer Reaktivkomponente in den Bereich der Plasmaquelle. Der Substratträger, beispielsweise ein planarer Drehteller, wird auf eine Sollgeschwindigkeit beschleunigt. In einem weiteren Schritt wird das Plasma der Plasmaquelle gezündet. Es erfolgt ferner eine Zündung des Sputterplasmas der Kathodenzerstäubungseinrichtung, die auf eine vorgegebene Sollleistung gebracht wird. Anschließend wird eine Partialdruckregelung im Bereich der Sputtereinrichtung aktiviert. Vorzugsweise wird ein vorgegebener Partialdrucksollwert über die Kathodenleistung stabilisiert.

In einem zweiten Schritt wird mit der Beschichtung der Substrate begonnen. Hierzu werden die Shutter geöffnet. Dabei hat sich gezeigt, dass nur eine geringe Änderung der im Arbeitspunkt eingestellten Regelungsparameter durch die Öffnung der Shutter notwendig ist. Eine gewünschte Schichtdicke kann über eine Beschichtungszeit bzw. eine Anzahl von Rotationen kontrolliert werden. Besonders bevorzugt ist eine in situ erfolgende optische Schichtdickenmessung durch den optischen Monitor 8.

Erfindungsgemäß erfolgt die reaktive Abscheidung einer Schicht in einem Arbeitspunkt einer Kennlinie oder eines Kennfeldes, der Sputtermaterial- und reaktivkomponentenmaterial-abhängig zur Minimierung eines optischen Verlustes der abgeschiedenen Schicht oder der durch Plasmaeinwirkung modifizierten Schicht gewählt wird. Im Folgenden werden einige bevorzugte Kennlinien dargestellt.

In Fig. 2 ist eine Kennlinie der Abhängigkeit eines Reaktivgasflusses von einem Partialdruck der Reaktivkomponente bei einem Kathodenzerstäubungsprozess in einem Beispiel mit einem Aluminiumtarget und mit Sauerstoff als reaktivem Bestandteil und konstanter Leistung der Sputtereinrichtung (Sputterleistung) angegeben. Bei kleinen Werten des Partialdrucks steigt der Sauerstofffluss zuerst steil an und fällt nach einem Scheitelpunkt S ab, um bei höherem Partialdruck nach einem Minimum wieder anzusteigen. Bei sehr niedrigem Sauerstoffpartialdruck stellt sich ein Zustand mit einer weitgehend metallischen Targetoberfläche ein, wobei metallische Schichten auf dem Substrat deponiert werden. Wird der Sauerstoffpartialdruck über einen Wert, der dem Scheitelpunkt entspricht, erhöht, folgt bei flußgeregeltem Prozess ein Übergang zu einem

Oxid- oder Compound-mode, bei der die Targetoberfläche vollständig mit Reaktionsprodukten belegt ist und stöchiometrische Schichten mit ungünstigen Schichteigenschaften auf dem Substrat aufwachsen. Der mit O bezeichnete Pfeil gibt den Übergang zu dem Oxid- oder Compound-mode an. Die gestrichelte Kurve in Figur 2  
5 beschreibt die zugehörige Abscheidungsrate. Es ist ersichtlich, dass diese bei einem niedrigen Reaktivgaspartialdruck maximal ist und bei wachsendem Reaktivgaspartialdruck abfällt, bis sie in einen Sättigungsbereich parallel zur Abszisse kommt. Vom oxidischen her kommend, findet der Übergang in den metallischen Bereich erst bei niedrigerem Sauerstoff-Partialdrücken statt, so dass die Kennlinie eine Hysterese aufweist. Der  
10 Bereich zwischen dem Scheitelpunkt und dem Minimum der Kennlinie ist im allgemeinen nicht ohne aufwendige Regelungsmaßnahmen zugänglich, ermöglicht jedoch die Abscheidung von substöchiometrischen Schichten mit einer hohen Abscheidungsrate. Das erfindungsgemäße Verfahren wird vorzugsweise in einem vorgegebenen Bereich der Kennlinie mit ansteigendem oder abfallendem Gasfluss nahe des Scheitelpunktes S  
15 durchgeführt, da hier relativ hohe Sputterraten erreicht werden können. Besonders bevorzugt ist der Bereich nahe dem Scheitelpunkt S der Kennlinie, mit einem Gasfluss des ersten Bestandteils  $O_2$  welcher bei der Abscheidung der Schicht 1 höchstens um 50%, unterhalb des Maximalwerts im Scheitelpunkt S, besonders bevorzugt höchstens 20% bis 10% unterhalb des Maximalwerts im Scheitelpunkt S liegt. In diesem Bereich ist  
20 eine hohe Abscheidungsrate einer substöchiometrischen Schicht erreichbar, die anschließend einer Plasmaeinwirkung ausgesetzt wird. Materialabhängig, z. B. bei Ti, Nb, TiNb kann erfindungsgemäß in dem Übergangsbereich rechts des Scheitelpunktes S gearbeitet werden, während für andere Materialien, z. B. Al, Si der Bereich links des Scheitelpunktes S bevorzugt wird.

25

In Fig. 3 ist analog eine Kennlinie bei einem konstant gehaltenen Reaktivgasfluss dargestellt, bei der ein Sollwert eines Reaktivgaspartialdrucks mit Hilfe der Sputterleistung eingestellt wird. Der substöchiometrische Bereich liegt hier links des mit O bezeichneten Pfeils. Bei diesem Regelungsverfahren wird erfindungsgemäß bevorzugt, jedoch nicht  
30 ausschließlich in einem Bereich um das Minimum der Kennlinie gesputtert.

In Fig. 4 ist eine weitere Kennlinie dargestellt, bei der bei konstanter Sputterleistung ein Sollwert einer Sputterkathodenspannung mit Hilfe eines Reaktivgasflusses und in dem Bereich rechts des mit O bezeichneten Übergangs zu einer substöchiometrischen

Verbindung eingestellt wird. Bevorzugt ist hier ein Bereich um das Maximum S des Übergangs.

Ein konstanter Reaktivgasfluss wird bei der in Fig. 5 dargestellten Kennlinie verwendet, wobei ein Sollwert eines Quotienten aus einer Sputterrate und einem Reaktivgaspartialdruck mit Hilfe der elektrischen Leistung der Sputtereinrichtung auf einen vorgegebenen Sollwert geregelt wird. Die durchgezogene Kurve bezeichnet hierbei die Kennlinie bei Sauerstoff als Reaktivgas, während die gestrichelte Kurve die Kennlinie bei Stickstoff als Reaktivgas bezeichnet. Die mit O1 bzw. O2 bezeichneten Pfeile geben den Übergang von einem substöchiometrischen rechts des Übergangs zu einem stöchiometrischen Regime links des Übergangs jeweils für Sauerstoff bzw. Stickstoff als Reaktivgas an. Ersichtlich ist, dass die Position dieses Übergangs von dem verwendeten Reaktivgas abhängig ist. Ferner ist das im Fall von Sauerstoff rechts des erwähnten Übergangs bei O1 liegende Minimum in der entsprechenden Kennlinie für Stickstoff verschwunden; dem entspricht ein Fehlen einer Hysterese. Der Quotient aus Sputterrate und Reaktivgaspartialdruck kann aus einem Quotienten aus einer Material- und Reaktivgaspartialdruck-Plasmalinienintensität bestimmt werden. Mit Material ist hierbei das Material der Sputterkathode gemeint; im vorliegenden Fall Silizium. Eine derartige Zweiliniemessung hat den Vorteil, dass das Ergebnis relativ unabhängig von einer Verschmutzung eines Lichtleitereintrittsfensters ist, durch das die entsprechenden Emissionslinien gemessen werden.

Typische Werte für die vorliegende Einrichtung sind für den Argonfluss 40 sccm/min und für den Sauerstofffluss 30 sccm/min im Bereich der Sputtereinrichtung. Bevorzugt wird ein Sauerstoffpartialdruck aus dem Signal einer im Bereich der Sputtereinrichtung angeordneten Lambdasonde bestimmt. Die typische Leistung einer derartigen Dual Magnetronkathoden Station bei dem erfindungsgemäßen Verfahren liegt im Bereich von 4 KW. Im Bereich der Plasmaquelle ist der typische Sauerstofffluss in einem Bereich von 20 sccm/min, während der Argonfluss in einem Bereich von 2 sccm/min liegt. Die Leistung bei einem RF-Betrieb liegt in einem Bereich um 1 KW.

Zur Regelung der Sputtereinrichtung 3, 7 und der Plasmaquelle 5 sowie der Bewegung der Substrate ist eine zeichnerisch nicht dargestellte Steuereinheit vorgesehen. Die Regelung erfolgt in einem Parameterraum, in dem Kennlinien bzw. Kennfelder aufgespannt sind, wie bereits genauer erläutert wurde. Bei einer bevorzugten

Ausführungsform der Erfindung ist vorgesehen, dass ein Signal des optischen Monitors 8 herangezogen wird, um die Betriebsparameter zur Optimierung der optischen Qualität, insbesondere zur Minimierung der optischen Verluste der abgeschiedenen Schicht einzustellen. Dies erfolgt vorzugsweise online. Ebenso ist eine derartige Regelung schichtweise oder bei einem Übergang von einer Schicht zur nächsten vorgesehen. Besonders bevorzugt ist die Verwendung des optischen Signals für die Durchführung einer Führungsregelung zur Berücksichtigung von Langzeitdriften in den Schichteigenschaften, wie Transmission, Reflektion, und/oder optischer Verluste. Ferner wird die Funktion der die Sputtereinrichtung 3,7 und die Plasmaquelle 5 umfassenden Gesamtvorrichtung in Hinblick auf optische Eigenschaften der abgeschiedenen und modifizierten Schicht oder in Hinblick auf die Geschwindigkeit der Schichtherstellung optimiert. Hierzu werden beispielsweise mittels der Steuereinrichtung entsprechende Arbeitspunkte auf einer Kennlinie bei anschließender Plasmaeinwirkung gewählt und ein Optimierungswert bestimmt.

15

Optisches Monitoring kann unmittelbar nach jedem Sputtern durch die Sputtereinrichtung 3, 7 und/oder nach einer Plasmaeinwirkung durch die Plasmaquelle 5 auf mindestens einem Substrat erfolgen.

Fig. 6 zeigt ein Beispiel der optischen Transmission einer mit dem erfindungsgemäßen Verfahren hergestellten Schicht als Funktion der Wellenlänge (obere Kurve  $S_1$ ) im Vergleich mit einer Schicht, welche nach der unterstöchiometrischen Abscheidung nicht dem Sauerstoffplasma aus der Plasmaquelle 5 ausgesetzt wurde (untere Kurve  $S_2$ ). Die Beschichtungsparameter der beiden Schichten sind bis auf die Oxidation im Bereich der Plasmaquelle 5 gleich. Die unterstöchiometrische Schicht zeigt eine sehr geringe Transmission dafür aber sehr hohe Verluste, so dass diese als Antireflexschicht oder Filter oder dergl. unbrauchbar ist. Offenbar ist zu erkennen, dass die Oxidation durch die Plasmaeinwirkung eine sehr effektive Verbesserung der Schichteigenschaften ermöglicht (obere Kurve  $S_1$ ).

Fig. 7 zeigt ein Beispiel einer optischen Transmission einer Schicht als Funktion der Wellenlänge mit der Substratgeschwindigkeit als Parameter der Kurvenschar. Bei einer hohen Geschwindigkeit von z.B. 180 oder 120 U/min ist die optische Transmission der Schicht höher (obere Kurve) als nur mit halber Geschwindigkeit von z.B. 60 U/min (untere Kurve).

Fig. 8 zeigt Beispiele von Einzelschichten unterschiedlicher Dicke, die gemäß der Erfindung hergestellt wurden. Hierbei bezeichnen die Kurven A und B  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ -Schichten mit einer Dicke von 1.000 nm bzw. 500 nm. Die Kurve C bezeichnet eine  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ -Einzelschicht mit einer Dicke von 1.000 nm. Die Kurven D und E bezeichnen  $\text{SiO}_2$ -Schichten mit 1.000 nm bzw. 500 nm Dicke. Erkennbar ist, dass die optischen Verluste von dem verwendeten Material, von der Schichtdicke und der Wellenlänge abhängig sind. Insgesamt sind die optischen Verluste sehr klein und steigen nur im Bereich der Absorptionskante des betreffenden Materials an.

Erfindungsgemäß abgeschiedene Einzelschichten aus einem hochbrechenden Material wie  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{ZrO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  erfordern für einen geringen optischen Verlust eine Abscheidung bei dem reaktiven Sputtern mit nur geringem Sauerstoffdefizit, wobei die Schichten danach dem reaktiven Plasma der Plasmaquelle ausgesetzt werden. Die Energie der Teilchen des reaktiven Plasmas der Plasmaquelle 5 ist dabei bevorzugt kleiner als 50 eV. Für niederbrechende Einzelschichten wie  $\text{SiO}_2$  kann ein geringer optischer Verlust auch mit einem größeren Sauerstoffdefizit beim reaktiven Sputtern und nachfolgender Einwirkung des reaktiven Plasmas der Plasmaquelle erreicht werden.

Erfindungsgemäß ergibt sich eine ausgezeichnete optische Qualität der Schichten, die zunächst substöchiometrisch mit einem definierten Sauerstoffmangel hergestellt und anschließend durch Plasmaeinwirkung zum stöchiometrischen Oxid aufoxidiert werden. Pro Umlauf wird typischerweise 0,2 bis 0,4 nm abgeschieden. Die abgeschiedene Schicht ist vorzugsweise röntgenamorph oder nanokristallin mit einer glatten Oberfläche, weist jedoch gleichzeitig eine dichte Struktur frei von Hohlräumen sogenannten voids auf, so dass eine Vermeidung von Wassereinbau aus der Atmosphäre erreicht wird, was ansonsten zu unerwünschten Brechwertänderungen führen würde. Die verbesserte Oberflächenstruktur ist wesentlich auf die Plasmaeinwirkung zurückzuführen, die insofern eine im Stand der Technik übliche Beaufschlagung des Substrats mit einer Bias - Spannung ersetzen kann.

Bei der erfindungsgemäßen Herstellung von verlustarmen Multilayerschichten, bei der auf einer ersten Schicht mittels einer reaktiv betreibbaren Beschichtungseinrichtung eine Abscheidung einer zweiten Schicht mit mindestens einer Reaktivkomponente erfolgt, ist ebenfalls eine Änderung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schichten mittels einer Reaktionseinrichtung vorgesehen. Die erste Schicht kann auch Substrat sein. Eine schematische Darstellung einer Multilayerschicht auf einem Substrat mit einer ersten

Schicht, einer zweiten Schicht und einem Interface der Dicke  $d_i$  in einem an die erste Schicht angrenzenden Bereich der zweiten Schicht ist in Fig. 9 gezeigt. Als Beschichtungseinrichtung kann dabei jede reaktiv betreibbare Beschichtungseinrichtung eingesetzt werden, insbesondere Einrichtungen, die nach dem Prinzip des physical vapor deposition, wie etwa Aufdampf- oder Sputtertechniken arbeiten. Besonders bevorzugt sind DC- oder AC-Magnetronquellen. Als Reaktionseinrichtung ist eine Plasmaquelle, beispielsweise eine DC-, HF-, MF- oder DC-Puls oder DC- plus HF- oder Mikrowellenplasmaeinrichtung bevorzugt.

Bevorzugt sind Multilayerschichten aus abwechselnd hoch- und niederbrechenden Schichten, wie sie insbesondere für optische Filter eingesetzt werden. Die Multilayerschichten können auch aus alternierenden hoch-, nieder- und mittelbrechenden Schichten bestehen. Als hochbrechende Schicht wird eine Schicht mit einem Brechungsindex im Wesentlichen größer als 1,9, vorzugsweise zwischen 1,9 und 2,6, angesehen.

Als niederbrechend wird eine Schicht mit einem Brechungsindex zwischen 1,3 und 1,5 bezeichnet. Mittelbrechende Schichten haben ein Brechungsindex zwischen 1,5 und 1,9. Beispiele für hochbrechende Materialien in diesem Sinne sind beispielsweise  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ ,  $\text{TiO}_2$  oder  $\text{ZrO}_2$ . Niederbrechend sind beispielsweise Schichten aus  $\text{SiO}_2$ .

In Figur 10 sind Transmissions- bzw. Reflexionswerte mit einer Anzahl von  $N_i = 21$  bzw.  $N_i = 79$  Interfaces für  $\text{Nb}_2\text{O}_5 / \text{SiO}_2$  Multilayerschichten in Abhängigkeit von der Wellenlänge dargestellt. Aus der Darstellung ist ersichtlich, dass mit wachsender Anzahl der Interfaces bzw. der Schichten der Multilayerschicht die optischen Verluste wachsen.

Die Abscheidung der Schichten sowie eine Änderung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schichten erfolgt bevorzugt durch das weiter oben beschriebene Verfahren, kann jedoch auch nach anderen Verfahren vorgenommen werden. Zur Verringerung eines optischen Verlustes der Multilayerschicht unter einem vorgegebenen Wert erfolgt in einem an die erste Schicht angrenzenden Bereich der zweiten Schicht, vorzugsweise mittels der Beschichtungseinrichtung ein Aufbau eines Interfaces mit einer Dicke  $d_i$  und einem Wert eines Defizits der Reaktivkomponente DEF kleiner als ein Wert  $\text{DEF}_i$ .

Erfindungsgemäß erfolgt ein Aufbau eines Interfaces mit einer Dicke  $d_i$  und einem Wert eines Defizits der Reaktivkomponente DEF kleiner als  $\text{DEF}_i$ , wobei die Multilayerschicht einen optischen Verlust aufweist, der einen vorgegebenen Mindestwert unterschreitet.

Bevorzugt ist bei dem erfindungsgemäßen Verfahren, wenn die Dicke  $d_i$  des Interfaces einen Mindestwert überschreitet. Der Rest der abgeschiedenen Schicht kann mit einem höheren Defizit DEF reaktiv abgeschieden werden.

5 Besonders bevorzugt wird das Interface durch Einwirkung der Reaktionseinrichtung mit möglichst vollständiger Stöchiometrie hergestellt.

Bevorzugt wird bei dem beschriebenen Verfahren eine niederbrechende Schicht aus  $\text{SiO}_2$  auf einer hochbrechenden Schicht, beispielsweise  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$  oder dergleichen abgeschieden. Als Reaktivkomponente kann statt Sauerstoff auch Kohlenstoff oder Stickstoff verwendet werden. Auf der niederbrechenden Schicht kann wieder eine  
10 hochbrechende abgeschieden werden.

Eine erfindungsgemäße Multilayerschicht kann auf verschiedene Weise hergestellt werden. Besonders einfach ist es, wenn Werte einer momentanen Dicke  $d(t)$  der zweiten Schicht ermittelt werden und, sobald  $d(t)$  größer als ein Wert  $d_i$  ist, die Abscheidung der zweiten Schicht mit einem Wert des Defizits der Reaktivkomponente DEF größer als  $\text{DEF}_i$   
15 vorgenommen wird. Dabei kann die Ermittlung der Werte der momentanen Dicke  $d(t)$  der zweiten Schicht während der Abscheidung der zweiten Schicht, beispielsweise in Abhängigkeit von einem Monitoring-Signal der optischen Monitoreinrichtung (8) erfolgen.

In Fig. 11 ist der Effekt einer Minimierung des optischen Verlustes für eine Multilayerschicht hergestellt nach dem erfindungsgemäßen Verfahren illustriert. Bei einer  
20  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ -/ $\text{SiO}_2$ -Multilayerschicht sind die Interfaces mit einem unterschiedlich hohen Defizit an Sauerstoff abgeschieden worden. Dabei bezeichnet A, A' die Werte von Reflektion bzw. Transmission in Abhängigkeit von der Wellenlänge für eine Multilayerschicht mit einem relativ großen Defizit an Sauerstoff am Interface, während B, B' die Werte von Transmission bzw. Reflektion für eine Multilayerschicht mit einem relativ geringen  
25 Sauerstoffdefizit an Interface bezeichnet. Die Kurven A, A' zeigen größere optische Verluste als die Kurven B, B'.

In Fig. 12 sind zur weiteren Illustrierung des erfindungsgemäßen Verfahrens für Einzelschichten aus hoch- bzw. niedrig brechendem Material und für Multilayerschichten mit abwechselnd hochbrechenden und niederbrechenden Schichten optische Verluste in  
30 Abhängigkeit von der Wellenlänge aufgetragen. Hier sind mit A die Werte einer Multilayerschicht mit 77 nicht optimierten Interfaces bezeichnet, während mit B Werte einer ansonsten gleichen Multilayerschicht mit 21 nicht optimierten Interfaces bezeichnet

sind. Die Verluste von B sind geringer als von A, weil die Anzahl der Interfaces nur 21 gegenüber 77 beträgt. Die Werte einer Multilayerschicht vergleichbar mit A, jedoch mit optimierten Interfaces sind mit XY bezeichnet. Die Kurve XY zeigt dabei extrem reduzierte Verluste gegenüber der Kurve A für die entsprechend Multilayerschicht. Die Kurven C, D, E und F bezeichnen hoch- bzw. niedrig brechende Einzelschichten mit einer Dicke von 1.000 nm bzw. 500 nm.

Fig. 13 zeigt Transmission und Reflektion in Abhängigkeit von der Wellenlänge für eine  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ -/ $\text{SiO}_2$ -Multilayerschicht, die nach dem erfindungsgemäßen Verfahren zur Erreichung geringster optischer Verluste hergestellt ist. Misst man die Transmission und Reflektion eines Filters als Funktion der Wellenlänge, so hat das Filter Stellen maximaler und minimaler Transmission. An den Stellen max. Transmission ist die Reflektion minimal und umgekehrt. An diesen Stellen lassen sich die Verluste am einfachsten bestimmen: man subtrahiert von 100%  $T_{\text{max}}$  und  $R_{\text{min}}$  oder  $T_{\text{min}}$  und  $R_{\text{max}}$ . Eine Multilayerschicht gemäß Fig. 13 ist bevorzugt für Breitbandfilter vorgesehen.

Fig. 14 illustriert für eine  $\text{SiO}_2$ -Interface-Schicht auf einer hochbrechenden Schicht den Effekt einer Variation der Dicke  $d$  der Interface-Schicht auf die optischen Verluste in Abhängigkeit von der Wellenlänge. Die mit A bezeichnete Kurve gibt Werte für eine 2,7 nm dicke Interface-Schicht, die eine deutliche Wellenlängenabhängigkeit zeigt. Im Vergleich dazu sind die Werte für eine 3,6 nm dicke Interface-Schicht mit B bezeichnet und zeigen erheblich geringere optische Verluste sowie eine weitgehende Unabhängigkeit von der Wellenlänge in dem dargestellten Bereich. Aus der Fig. 14 ist ferner ersichtlich, dass eine kritische Dicke der Interface-Schicht existiert, ab der es zu einer deutlichen Reduktion der optischen Verluste kommt, falls der Wert des Defizits der Reaktivkomponente DEF kleiner als ein kritischer Wert  $\text{DEF}_1$  gewählt ist. Bei einer niederbrechenden Schicht  $\text{SiO}_2$  auf einer hochbrechenden Schicht, beispielsweise  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , liegt der kritische Wert in einem Bereich zwischen 2,5 und 10,0 nm, vorzugsweise 2,6 nm, 2,7 nm ... 3,6 nm, 3,7 nm, 3,8 nm. Das Defizit  $\text{DEF} = 2 - x$  der Reaktivkomponente ist dabei relativ gering zu wählen, entsprechend einem Wert  $x$  der Reaktivkomponente von  $\text{SiO}_x$  im Bereich des Interfaces von größer als 1,5, 1,6 ... bis 1,8.

In einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens werden zur Herstellung der  $\text{SiO}_x$ -Schicht im Interface-Bereich zunächst relativ dünne Schichten pro Rotation des Substrattellers bei relativ geringer Sputterleistung und einem relativ geringen Sauerstoffdefizit hergestellt. Bevorzugt wird im Übergangsbereich zum Oxidmode reaktiv

gesputtert. Nach Erreichen einer vorgebbaren Schichtdicke, von beispielsweise 3,6 nm wird die SiOx-Schicht mit größerem Sauerstoffdefizit bei einer höheren Leistung abgeschleden und dem reaktiven Plasma der Plasmaquelle ausgesetzt. Dieses ist vorzugsweise konstant.

- 5 In Fig. 15 sind Kennlinien für die reaktive Abscheidung der Interface-Schicht mit geringem bzw. höheren Sauerstoffdefizit dargestellt. Mit A, A' sind Werte der Sputterspannung bzw. die Ausgangsleistung eines Lambda-Sensors bei 1 kW Sputterleistung und mit B und B' Werte der Sputterspannung und das Lambda-Signal bei einer Sputterleistung von 1,5 kW bezeichnet. Die Energie der schichtbildenden Teilchen liegt vorzugsweise zwischen  
10 einigen eV bis zu 200 eV. Bevorzugt ist, wenn die Teilchen des reaktiven Plasmas eine Energie von weniger als 50 eV haben.

- In Fig. 16 sind die zeitlichen Werteverläufe für wichtige Verfahrensparameter bei der reaktiven Kathodenzerstäubung mit Sauerstoff als reaktivem Bestandteil schematisch dargestellt, wie sie bei einer bevorzugten Ausführungsform des Verfahrens verwendet  
15 werden. Hierbei wird mit konstanten Werten der Plasmaquellenleistung, des Argonflusses im Bereich der Sputtereinrichtung sowie des Sauerstoffflusses im Bereich der Sputter- und der Plasmaquelle gearbeitet. Zu einem Zeitpunkt  $T_c$  wird die Leistung der Sputtereinrichtung erhöht. Ab diesem Zeitpunkt  $T_c$  ist der Sauerstoffpartialdruck im Bereich der Sputtereinrichtung reduziert. Bevorzugt ist zum Zeitpunkt  $T_c$  eine  
20 vorgegebene Schichtdicke von beispielsweise ca. 3 nm erreicht. Die bis zu diesem Zeitpunkt gesputterte Schicht weist ein relativ geringes Sauerstoffdefizit auf. Nach dem Zeitpunkt  $T_c$  gesputterte Schichten weisen dagegen ein relativ hohes Sauerstoffdefizit auf. Es versteht sich, dass sich in weiteren Ausführungsformen der Erfindung auch die Parameterwerte anderer Größen als die der Sputterleistung bzw. des  
25 Sauerstoffpartialdrucks im Bereich der Sputtereinrichtung zeitlich varlieren können.

- Durch die Abscheidung von relativ dünnen SiOx-Schichten mit einem relativ geringen Sauerstoffdefizit kann gewährleistet werden, dass sowohl die Interface-Schicht als auch die darunter liegende Schicht, beispielsweise aus Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, vermöge der auf die SiOx-Abscheidung folgenden Wirkung der reaktiven Plasmaquelle als stöchiometrische Schicht  
30 vorliegen. Insbesondere kann durch eine derartige Verfahrensweise erreicht werden, dass ein eventueller Entzug der Reaktivkomponente, insbesondere des Sauerstoffs, durch das reaktionsfreudige SiOx aus der darunter liegenden Schicht (Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) durch Einwirkung der Plasmaquelle kompensiert werden kann. Wird das SiOx dagegen mit einer zu hohen Rate

abgeschieden, kann es durch reaktive Plasmaeinwirkung zwar noch zu einem stöchiometrischen  $\text{SiO}_2$  oxidiert werden, wird dabei aber unter Umständen so dicht, dass ein ausreichender Durchgriff der Wirkung der Plasmaquelle zur Gewährleistung einer Stöchiometrie der darunter liegenden Schicht zu der unter der  $\text{SiOx}$ -Schicht liegenden Schicht nicht möglich ist. Ab einer bestimmten Dicke der mit einem geringen Sauerstoffdefizit aufgetragenen Interface-Schicht kann neu auf die bereits abgeschiedene Schicht aufgetragenes  $\text{SiOx}$  der darunter liegenden Schicht keinen Sauerstoff mehr entziehen, so dass die weitere Abscheidung von  $\text{SiOx}$  mit einem höheren Defizit an Sauerstoff erfolgen kann.

## PATENTANSPRÜCHE

5

1. Verfahren zur Herstellung einer Schicht (1) auf einem bewegbaren Substrat (2) in einer Vakuumkammer (10) mit einem Restgas mittels einer Sputtereinrichtung (3, 7), wobei die Schicht (1) aus zumindest zwei Konstituenten gebildet wird und zumindest ein erster Konstituent ein Sputtermaterial der Sputtereinrichtung (3, 7) und zumindest  
10 ein zweiter Konstituent eine Reaktivkomponente des Restgases ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass folgende Schritte vorgesehen sind:

- Unter Zuführung einer Reaktivkomponente reaktive Abscheidung einer Schicht (1) mit einem vorgegebenen stöchiometrischen Defizit des zweiten  
15 Konstituenten in einem räumlichen Bereich der Sputtereinrichtung (3, 7) auf dem Substrat (2),

- Bewegung des Substrats (2) mit der abgeschiedenen Schicht (1) in einen räumlichen Bereich einer Plasmaquelle (5), die in einem vorgegebenen Abstand von der Sputtereinrichtung (3, 7) in der Vakuumkammer (10) angeordnet ist,  
20

- Modifizierung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schicht (1) durch Plasmaeinwirkung der Plasmaquelle (5), vorzugsweise unter Zuführung einer vorgegebenen Menge der Reaktivkomponente, zur Verringerung eines optischen Verlustes der Schicht (1).  
25

2. Verfahren zur Herstellung einer Schicht (1) auf einem bewegbaren Substrat (2) in einer Vakuumkammer (10) mit einem Restgas mittels einer Sputtereinrichtung (3, 7), wobei die Schicht (1) aus zumindest zwei Konstituenten gebildet wird und zumindest ein erster Konstituent ein Sputtermaterial der Sputtereinrichtung (3, 7) und zumindest ein zweiter Konstituent eine Reaktivkomponente des Restgases ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass folgende Schritte vorgesehen sind:  
30

- Unter Zuführung einer Reaktivkomponente, reaktive Abscheidung einer Schicht (1) mit einer vorgegebenen Schichtdicke und einem optischen  
35

Verlust, der einen vorgegebenen Mindestwert unterschreitet, in einem räumlichen Bereich der Sputtereinrichtung (3, 7) auf dem Substrat (2),

- 5       -       Bewegung des Substrats (2) mit der abgeschiedenen Schicht (1) in einen räumlichen Bereich einer Plasmaquelle (5), die in einem vorgegebenen Abstand von der Sputtereinrichtung (3, 7) in der Vakuumkammer (10) angeordnet ist,
  - 10       -       Modifizierung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schicht (1) durch Plasmaeinwirkung der Plasmaquelle (5), vorzugsweise unter Zuführung einer vorgegebenen Menge der Reaktivkomponente, zur Verringerung eines optischen Verlustes der Schicht (1).
3. Verfahren nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sputtereinrichtung (3, 7) in einem Sputtermaterial- und Reaktivgasmaterial-abhängigen Arbeitspunkt einer Kennlinie oder eines Kennfeldes betrieben wird.
- 15
4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein optisches Monitoring nach Abscheidung einer vorgegebenen Schichtdicke zur Einstellung von optischen Eigenschaften der Schicht (1) vorgesehen ist.
- 20
5. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 2 bis 4, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein optisches Monitoring der Schicht (1) nach Plasmaeinwirkung der Plasmaquelle (5) zur Einstellung von optischen Eigenschaften der Schicht (1) vorgesehen ist.
- 25
6. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein optisches Monitoring der Schicht (1) nach Abscheidung einer vorgegebenen Schichtdicke und nach Plasmaeinwirkung der Plasmaquelle (5) zur Einstellung von optischen Eigenschaften der Schicht (1) vorgesehen ist.
- 30
7. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 4 bis 6, **dadurch gekennzeichnet**, dass als optisches Monitoring eine Ermittlung von Transmission, Reflektion und /oder Verlusten bei einer oder mehreren Wellenlängen der Schicht (1) vorgesehen ist.
- 35

8. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Abhängigkeit von einem Monitoring-Signal einer optischen Monitoreinrichtung (8) eine Regelung der Sputtereinrichtung (3, 7) erfolgt.
- 5 9. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet**, dass in Abhängigkeit von einem Monitoring-Signal einer optischen Monitoreinrichtung (8) eine Regelung der Plasmaquelle (5) erfolgt.
- 10 10. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 4 bis 9, **dadurch gekennzeichnet**, dass das optische Monitoring in Abhängigkeit von vorgegebenen Zeitpunkten und/oder von vorgegebenen Schichtdicken erfolgt.
- 15 11. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Gehalt der Reaktivkomponente in der Schicht (1) bis zur stöchiometrischen Zusammensetzung erhöht wird.
- 20 12. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schicht (1) bezogen auf die Reaktivkomponente des Restgases mit einem vorgegebenen Defizit zwischen 0 und 100 % der Reaktivkomponente abgeschieden wird.
- 25 13. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Partialdruck der Reaktivkomponente über einen Gasfluss der Reaktivkomponente und/oder über eine elektrische Leistung der Sputtereinrichtung (3, 7) geregelt wird.
- 30 14. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Sputterkathodenspannung der Sputtereinrichtung (3, 7) über einen Gasfluss der Reaktivkomponente geregelt wird.
15. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Quotient einer Sputterrate zu einem Partialdruck einer Reaktivkomponente über eine Sputterleistung geregelt wird.

16. Verfahren nach Anspruch 15, **dadurch gekennzeichnet**, dass der Quotient aus dem Quotienten einer ersten Linienintensität und einer zweiten Linienintensität bestimmt wird, wobei die erste Linienintensität ein Maß für eine Sputterraten und die zweite Linienintensität für einen Partialdruck der Reaktivkomponente ist.
- 5
17. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Reaktivkomponente Sauerstoff, Kohlenstoff und/oder Stickstoff ist.
- 10
18. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass Partialdrücke der Reaktivkomponente im Bereich der Sputtereinrichtung (3, 7) und im Bereich der Plasmaquelle (5) im wesentlichen unabhängig voneinander eingestellt werden.
- 15
19. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass eine Plasmaeinwirkung mit einem Plasma einer Plasmaquelle (5) erfolgt, welches zumindest die Reaktivkomponente im Plasma enthält.
- 20
20. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Schicht (1) von der substöchiometrischen Zusammensetzung zu einer stöchiometrischen Verbindung modifiziert wird.
- 25
21. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (2) mit einer vorgegebenen Geschwindigkeit an der Plasmaquelle (5) und/oder der Sputtereinrichtung (3, 7) vorbeigeführt wird.
- 30
22. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (2) an der Plasmaquelle (5) und/oder der Sputtereinrichtung (3, 7) mit einer variablen Geschwindigkeit vorbei bewegt wird.
23. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (2) mehrfach an der Sputtereinrichtung (3, 7) und/oder an der Plasmaquelle (5) vorbei bewegt wird.

24. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Gasfluss der Reaktivkomponente in Abhängigkeit von optischen Eigenschaften der Schicht (1) gesteuert oder geregelt wird.
- 5 25. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (2) vor, während oder nach der Modifizierung mit Wärme beaufschlagt wird, vorzugsweise mittels einer Strahlungsheizung.
- 10 26. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass ein Gasfluss der Reaktivkomponente in Abhängigkeit von einer abgeschiedenen Schichtdicke und/oder einer Zeitdauer der Modifizierung und/oder einer Anzahl der Vorbeiführungen an der Plasmaquelle (5) gesteuert oder geregelt wird.
- 15 27. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Sputtereinrichtung (3, 7) eine, vorzugsweise Magnetron-unterstützte Kathodenzerstäubungsquelle vorgesehen ist.
- 20 28. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sputtereinrichtung (3, 7) mit einem elektrischen Wechselfeld betrieben wird.
- 25 29. Verfahren zur Herstellung einer Multilayerschicht mit zumindest einer reaktiv betreibbaren Beschichtungseinrichtung (3) und zumindest einer Reaktionseinrichtung (5) in einer Vakuumkammer (10), wobei auf zumindest einem relativ zu der Beschichtungseinrichtung (3) oder der Reaktionseinrichtung (5) bewegbaren Substrat (2) auf einer ersten Schicht eine Abscheidung einer zweiten Schicht mit der Reaktivkomponente erfolgt und eine Änderung der Struktur und/oder Stöchiometrie zumindest einer Schicht mittels der Reaktionseinrichtung (5) erfolgt, **dadurch**
- 30 **gekennzeichnet**, dass zur Verringerung eines optischen Verlustes der Multilayerschicht unter einen vorgegebenen Wert in einem an die erste Schicht angrenzenden Bereich der zweiten Schicht ein Aufbau eines Interfaces mit einer Dicke  $d_i$  und einem Wert eines Defizits der Reaktivkomponente DEF kleiner als ein Wert  $DEF_1$  erfolgt.

30. Verfahren nach Anspruch 29, **dadurch gekennzeichnet**, dass Werte einer momentanen Dicke  $d(t)$  der zweiten Schicht, vorzugsweise während der Abscheidung der zweiten Schicht, ermittelt werden und sobald  $d(t)$  größer als  $d_i$  ist, die Abscheidung der zweiten Schicht mit einem Wert des Defizits der Reaktivkomponente DEF größer als DEF<sub>i</sub> erfolgt.
31. Verfahren nach Anspruch 29 oder 30, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest eine der Schichten nach zumindest einem der Verfahren gemäß den Ansprüchen 1 bis 28 hergestellt wird.
32. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 29 bis 31, **dadurch gekennzeichnet**, dass die erste Schicht hochbrechend und die zweite Schicht niederbrechend oder dass die erste Schicht niederbrechend und die zweite Schicht hochbrechend ausgebildet ist, wobei die hochbrechende Schicht beispielsweise aus Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und die niederbrechende Schicht beispielsweise aus SiO<sub>2</sub> besteht.
33. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 29 bis 32, **dadurch gekennzeichnet**, dass als hochbrechende Schicht Nb<sub>2</sub>O<sub>5</sub> und als niederbrechende Schicht SiO<sub>2</sub> vorgesehen ist und Dicke  $d_i$  der Interface-Schicht einen Wert von 2,5 nm, 2,6 nm, 2,7 nm ... 3,6 nm ... 10,0 nm und das Defizit der Reaktivkomponente DEF<sub>i</sub> im Bereich des Interfaces einen Wert von kleiner als 0,5, 0,4, 0,3, 0,2, bevorzugt kleiner als 0,1 aufweisen.
34. Verfahren nach zumindest einem der vorhergehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, dass für eine gegebene Dicke  $d_i$  des Interfaces mit einem zunehmenden Wert der Abscheidungsrate ein abnehmender Wert des Defizits der Reaktivkomponente DEF gewählt wird.
35. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 29 bis 34, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Multilayerschicht eine Anzahl von Interfaces zwischen hoch- und niederbrechenden Schichten  $N_i$  größer als 3, vorzugsweise größer als 20, besonders bevorzugt größer als 80 aufweist.
36. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 29 bis 35, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Beschichtungseinrichtung (3) ein vorzugsweise mit

Mittelfrequenz betriebenes Magnetron-Quellensystem vorzugsweise mit zwei nebeneinander liegenden Magnetron-Anordnungen und/oder die Reaktiveinrichtung (5) eine vorzugsweise im RF-Bereich arbeitende Plasmaquelle ist.

- 5 37. Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 29 bis 36, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Änderung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schichten jeweils nach Abscheidung einer Schicht mit einer vorgegebenen Schichtdicke erfolgt.
- 10 38. Vorrichtung zur Herstellung einer Schicht (1) auf einem Substrat (2) mittels einer Sputtereinrichtung (3, 7) in einer Vakuumkammer (10) mit einem Restgas, wobei die Schicht (1) aus zumindest zwei Konstituenten gebildet wird und zumindest ein erster Konstituent ein Sputtermaterial der Sputtereinrichtung (3, 7) und zumindest ein zweiter Konstituent eine Reaktivkomponente des Restgases ist, **dadurch gekennzeichnet**,  
15 dass
- Mittel zur reaktiven Abscheidung einer Schicht (1) auf dem Substrat (2) unter Zuführung einer Reaktivkomponente mit einem vorgegebenen stöchiometrischen Defizit des reaktiven Bestandteils in einem räumlichen Bereich der Sputtereinrichtung (3, 7),  
20
  - Mittel zur Bewegung des Substrats (2) mit der abgeschiedenen Schicht (1) in einen räumlichen Bereich einer Plasmaquelle (5), die in einem vorgegebenen Abstand von der Sputtereinrichtung (3, 7) in der Vakuumkammer (10) angeordnet ist,  
25
  - Mittel zur Modifizierung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schicht (1) durch Plasmaeinwirkung der Plasmaquelle (5), vorzugsweise unter Zuführung einer vorgegebenen Menge der Reaktivkomponente, zur Verringerung eines optischen Verlustes der Schicht (1)  
30
- vorgesehen sind.

- 35 39. Vorrichtung zur Herstellung einer Schicht (1) auf einem Substrat (2) mittels einer Sputtereinrichtung (3, 7) in einer Vakuumkammer (10) mit einem Restgas, wobei die Schicht (1) aus zumindest zwei Konstituenten gebildet wird und zumindest ein erster

Konstituent ein Sputtermaterial der Sputtereinrichtung (3, 7) und zumindest ein zweiter Konstituent eine Reaktivkomponente des Restgases ist, **dadurch gekennzeichnet**, dass

- 5        -        Mittel zur reaktiven Abscheidung einer Schicht (1) auf dem Substrat (2) in einem räumlichen Bereich der Sputtereinrichtung (3, 7) unter Zuführung einer Reaktivkomponente mit einem bei einer vorgegebenen Schichtdicke einen Mindestwert unterschreitenden optischen Verlust,
- 10       -        Mittel zur Bewegung des Substrats (2) mit der abgeschiedenen Schicht (1) in einen räumlichen Bereich einer Plasmaquelle (5), die in einem vorgegebenen Abstand von der Sputtereinrichtung (3, 7) in der Vakuumkammer angeordnet ist,
- 15       -        Mittel zur Modifizierung der Struktur und/oder Stöchiometrie der Schicht (1) durch Plasmaeinwirkung der Plasmaquelle (5), vorzugsweise unter Zuführung einer vorgegebenen Menge der Reaktivkomponente, zur Verringerung eines optischen Verlustes der Schicht (1)
- 20       vorgesehen sind.

40. Vorrichtung nach Anspruch 38 oder 39, **dadurch gekennzeichnet**, dass in einem Bereich der Sputtereinrichtung (3, 7) und in einem Bereich der Plasmaquelle (5) jeweils eine Gaszuführung und/oder eine Pumpeinheit angeordnet und die Bereiche

25       vorzugsweise durch Blenden getrennt sind, welche Durchlässe für zumindest ein Substrat (2) aufweisen.

41. Vorrichtung nach Anspruch 39 oder 40, **dadurch gekennzeichnet**, dass das Substrat (2) auf einem Drehteller (6) beabstandet zur Sputtereinrichtung (3, 7) und zur

30       Plasmaquelle (5) angeordnet ist.

42. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 41, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Substrate (2, 2') auf dem Drehteller (6) angeordnet sind.

43. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 42, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sputtereinrichtung (3, 7) und die Plasmaquelle (5) korrespondierend zu dem Drehteller (6) in etwa in Umfangsrichtung des Drehtellers (6) angeordnet sind.
- 5
44. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 43, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest zwei Sputtereinrichtungen (3, 7) vorzugsweise sich diametral gegenüberliegend angeordnet sind.
- 10
45. Vorrichtung nach Anspruch 44, **dadurch gekennzeichnet**, dass mindestens eine Plasmaquelle (5) räumlich zwischen den Sputtereinrichtungen (3, 7) angeordnet ist.
46. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 45, **dadurch gekennzeichnet**, dass räumlich zwischen den Sputtereinrichtungen (3, 7) eine optische Messeinrichtung zur Messung einer optischen Transmission, Reflexion und/oder Verluste einer auf dem Substrat (2) abgeschiedenen Schicht (1) angeordnet ist.
- 15
47. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 46, **dadurch gekennzeichnet**, dass räumlich zwischen den Sputtereinrichtungen (3, 7) und der Plasmaquelle (5) mindestens eine optische Messeinrichtung angeordnet ist.
- 20
48. Vorrichtung nach Anspruch 46 oder 47, **dadurch gekennzeichnet**, dass die optische Messeinrichtung ein Einwellenlängen- oder Mehrwellenlängen- Photometer und/oder Ellipsometer ist.
- 25
49. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 48, **dadurch gekennzeichnet**, dass zumindest in einem Bereich der Vakuumkammer (10) eine Heizanordnung zum Erhitzen des Substrats vorgesehen ist.
- 30
50. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 49, **dadurch gekennzeichnet**, dass als Sputtereinrichtung (3, 7) eine Magnetron-unterstützte Kathodenzerstäubungsquelle vorzugsweise mit zwei nebeneinander liegenden Magnetron-Anordnungen vorgesehen ist.
- 35

51. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 50, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Sputtereinrichtung (3, 7) mit einem elektrischen Wechselfeld, vorzugsweise in einem eine Hochfrequenz-, einem Mittelfrequenz- oder einem gepulsten DC-Bereich betrieben wird.

5

52. Vorrichtung nach zumindest einem der Ansprüche 39 bis 51, **dadurch gekennzeichnet**, dass die Plasmaquelle (5) eine ECWR-Quelle, eine Hall End Plasmaquelle, eine Heisskathoden DC Plasmaquelle, eine Hochfrequenz-Plasmaquelle, eine Mittelfrequenz- oder eine gepulste DC-Plasmaquelle ist.

10

53. Vorrichtung zur Herstellung einer Multilayerschicht mit zumindest einer reaktiv betreibbaren Beschichtungseinrichtung (3), insbesondere einer Sputtereinrichtung und zumindest einer Reaktionseinrichtung (5), insbesondere einer Plasmaquelle in einer Vakuumkammer (10), wobei auf zumindest einem relativ zu der

15 Beschichtungseinrichtung (3) und der Reaktionseinrichtung (5) bewegbaren Substrat auf einer ersten Schicht eine Abscheidung einer zweiten Schicht mit mindestens einer Reaktivkomponente erfolgen kann und eine Änderung der Struktur und/oder Stöchiometrie zumindest einer Schicht mittels der Reaktionseinrichtung (5) erfolgt, **dadurch gekennzeichnet**, dass zur Verringerung eines optischen Verlustes der

20 Multilayerschicht unter einem vorgegebenen Wert eine Steuereinrichtung zur Steuerung von Beschichtungs- und Reaktionseinrichtung vorgesehen ist, mittels der in einem an die erste Schicht angrenzenden Bereich der zweiten Schicht ein Aufbau eines Interface mit einer Dicke  $d_i$  und einem Wert eines Defizits der Reaktivkomponente DEF kleiner als ein Wert  $DEF_i$  erfolgen kann.

25

54. Multilayerschicht hergestellt gemäß einem Verfahren nach zumindest einem der Ansprüche 29 bis 37.

30

35